

Analisis Eksperimental Fluks Kalor pada Celah Sempit Anulus Berdasarkan Variasi Suhu Air Pendingin Menggunakan Bagian Uji HeaTiNG-01

Bambang Riyono^{1,*}, Indarto², Sinta Tri Habsari¹, Mulya Juarsa³

Kiswanta⁴, Ainur R.⁴, Edy S.⁴, Joko P.W.⁴, Ismu H.⁴

¹⁾ Badan Pengawas Tenaga Nuklir – BAPETEN

Jl. Gajah Mada No. 8 - Jakarta

²⁾ Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik – Universitas Gadjah Mada,

Jl. Grafika No.2, Jogjakarta 55281

³⁾ Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Kampus UI, Depok 16424

⁴⁾ Laboratorium Termohidrolika Eksperimental BOFA PTRKN BATAN

Gd. 80 Kawasan PUSPIPTK Serpong-Tangerang 15310

Abstract

Experiment to investigate the mechanism of boiling heat transfer in a narrow gap on severe accident scenarios of TMI-2 nuclear power plant is necessary to develop the understanding of the related accident management. The present study aimed to obtain heat flux value and critical heat flux (CHF) during boiling heat transfer process in a narrow gap of annulus. The study was experimentally carried out using the HeaTiNG 01 test with water as cooling fluid which temperature was varied at 75°C, 85°C dan 95°C. The rod was heated to 650°C. The boiling process during cooling was investigated by recording the transient temperature of the heated rod. The data was used to calculate the heat flux and wall superheat which results were represented in a boiling curve. The experimental results showed that the CHF value of the cooling media at 75°C was lower compared with that of at 85°C and 95°C. It was found that the values of CHF at 85°C and 95°C were close. The maximum CHF value at 75°C was 230 kW/m², while at 95°C was 282 kW/m². The CHF values at various position of heated rod was found to follow polynomial correlation. By comparing the boiling film areas from experimental results with that of Bromley correlation, it was concluded that boiling process in a narrow gap could not categorized as pool boiling process.

Keywords: severe accident, annulus, heat flux, CHF, narrow gap, pool boiling

Abstrak

Eksperimen untuk mempelajari mekanisme perpindahan panas pendidihan pada celah sempit berdasarkan skenario kecelakaan parah PLTN TMI-2 perlu dilakukan untuk pemahaman terkait manajemen kecelakaan. Penelitian bertujuan untuk memperoleh nilai fluks kalor dan fluks kalor kritis (FKK) selama proses perpindahan panas pendidihan pada celah sempit anulus. Metode penelitian secara eksperimen menggunakan bagian uji HeaTiNG-01 dengan fluida pendingin adalah air. Eksperimen dilakukan dengan memvariasikan suhu air pendingin pada suhu 75°C, 85°C dan 95°C, dan memanaskan batang panas hingga mencapai suhu awal 650°C. Kemudian proses pendidihan selama pendinginan direkam berdasarkan suhu transien pada batang panas. Data suhu digunakan untuk menghitung nilai fluks kalor dan *wall superheat*, hasilnya direpresentasikan melalui kurva didih. Hasil penelitian menunjukkan nilai FKK suhu pendingin 75°C lebih rendah dibandingkan FKK suhu pendingin 85°C dan 95°C, dimana nilai FKK untuk suhu pendingin 85°C dan 95°C agak berdekatan. Nilai FKK maksimum untuk suhu 75°C adalah 230 kW/m², sedangkan untuk suhu 95°C adalah 282 kW/m². Meskipun demikian korelasi FKK terhadap posisi aksial batang panas pada berbagai variasi suhu mengikuti korelasi polynomial. Peristiwa pendidihan pada celah sempit tidak termasuk kategori didih kolam dengan membandingkan area didih film hasil eksperimen menggunakan korelasi Bromley.

Kata kunci : kecelakaan parah, anulus, fluks kalor, FKK, celah sempit, didih kolam

Pendahuluan

Salah satu topik penelitian perpindahan panas pendidihan yang saat ini masih terus dilakukan

adalah permasalahan yang berhubungan dengan interaksi dan karakterisasi antara lelehan teras (*debris*) di bagian bawah bejana dengan dinding bejana reaktor pada kasus kecelakaan parah (*severe accident* (SA)) PLTN Three Mile Island Unit 2 (TMI-2). Pada skenario kecelakaan SA

* Alamat korespondensi: e-mail: b.riyono@bapeten.go.id

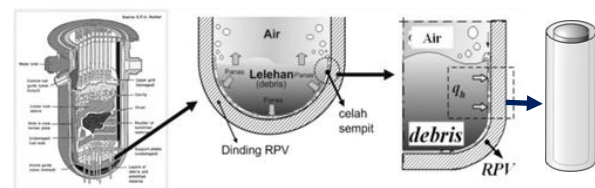
untuk TMI 2, saat lelehan teras (*debris*) bergerak ke bawah dimana bagian bawah dinding bejana reaktor dianggap masih menyimpan air dan *debris* bersentuhan dengan air, maka penguapan terjadi secara ekstrim dan terjadi pengurangan kuantitas air, kemudian sebagian volume air berpindah akibat area air digantikan oleh volume *debris*. Volume air yang terdorong ke arah berlawanan dengan arah gerak debris kembali lagi ke arah bawah dan memunculkan fenomena penggenangan ulang (*reflooding*) pada bagian celah yang terbentuk antara *debris* dan dinding bejana reaktor. Adanya celah sempit (*narrow gap*) yang terisi fluida di antara *debris* pada bagian bawah bejana dengan dinding bejana reaktor tersebut menjadi kunci utama adanya mekanisme pendinginan yang cepat pada proses perpindahan panas pendidihan yang pada akhirnya menyebabkan integritas bejana reaktor masih terjaga. Terbentuknya celah sempit diduga ikut memberikan kontribusi terhadap terjadinya proses pendinginan pada mekanisme perpindahan panas pendidihan yang melibatkan didih lapisan (*film boiling*), didih transisi (*transition boiling*), dan didih inti (*nucleate boiling*).

Celah sempit yang terbentuk dari skenario kecelakaan parah PLTN TMI-2 telah dilakukan kajian oleh beberapa peneliti dengan berbagai pendekatan, baik secara geometri maupun posisi. Xia dkk. (1996) melakukan eksperimen menggunakan R-133 pada tekanan atmosfer di celah sempit di antara pelat vertikal untuk mengevaluasi perpindahan pendidihan pada celah sempit dengan memprediksi nilai *critical heat flux* (CHF) atau Fluks Kalor Kritis menggunakan ukuran celah 0,8 mm, 1,5 mm, 5,0 mm dengan panjang pelat yang dipanaskan dari 56 mm sampai dengan 197 mm. Hasil eksperimen tersebut menunjukkan bahwa nilai CHF menurun dengan adanya penurunan ukuran celah. Perhitungan untuk kurva pendidihan telah dilakukan oleh Zhang dkk. (2003), yang mengusulkan perhitungan dengan memecahkan persamaan differensial yang pada studi awal yang dilakukan oleh Tanaka dkk. (2003) yang semula menggunakan model satu dimensi menjadi dua dimensi. Hasil perhitungan menunjukkan kurva didih yang lebih representatif dan mendekati kurva didih *Nukiyama* (1934). Analisis perpindahan panas dengan ukuran celah berbeda, yaitu 0,5 mm dan 7 mm (dimana celah 7 mm melampaui kriteria celah sempit) telah dilakukan pula oleh Juarsa dan Antariksawan (2008), untuk mengkonfirmasi kecenderungan karakteristik perpindahan panas yang telah diamati pada kedua

penelitian sebelumnya. Analisis tersebut menunjukkan bahwa korelasi *Bromley* (1950) untuk perpindahan panas pada didih kolam (*pool boiling*) hampir mendekati hasil eksperimen dengan ukuran celah 7,0 mm. Sementara untuk korelasi aliran uap laminar pada annulus dengan bilangan *Nusselt* 5,0 sesuai dengan ukuran celah 1,0 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada celah berukuran 0,5 mm pendidihan yang terjadi memiliki karakteristik berbeda dari didih kolam karena efek CCFL ternyata semakin kuat mempengaruhi waktu pendinginan, sedangkan untuk celah 7,0 mm karakteristik perpindahan panasnya memenuhi keadaan didih kolam. Berdasarkan hasil penelitian Juarsa dkk. (2009) maka kajian hasil penelitian umumnya hanya dilakukan pada kasus batang pemanas yang pendek (300 mm) dan suhu air pendingin adalah saturasi, sehingga penelitian perpindahan panas pada celah sempit untuk geometri anulus dengan panjang batang panas yang lebih panjang (800 mm) perlu dilakukan untuk mempelajari watak fluks kalor yang terjadi. Pendinginan menggunakan fluida pendingin air, dilakukan dengan suhu pendingin 75°C, 85°C, dan 95°C dan ukuran celah 1,0 mm. Kemudian sebagai langkah lanjutan, analisis fluks kalor dilakukan untuk lebih memahami fenomena yang muncul berdasarkan perubahan suhu awal batang panas berdasarkan kurva didih dan fluks kalor kritis (FKK) pada perpindahan panas pendidihan di celah sempit anulus yang berukuran 1,0 mm dengan tiga variasi suhu pendingin 75°C, 85°C, dan 95°C dan suhu batang panas 650°C menggunakan bagian uji *HeaTiNG-01*.

Metode Penelitian

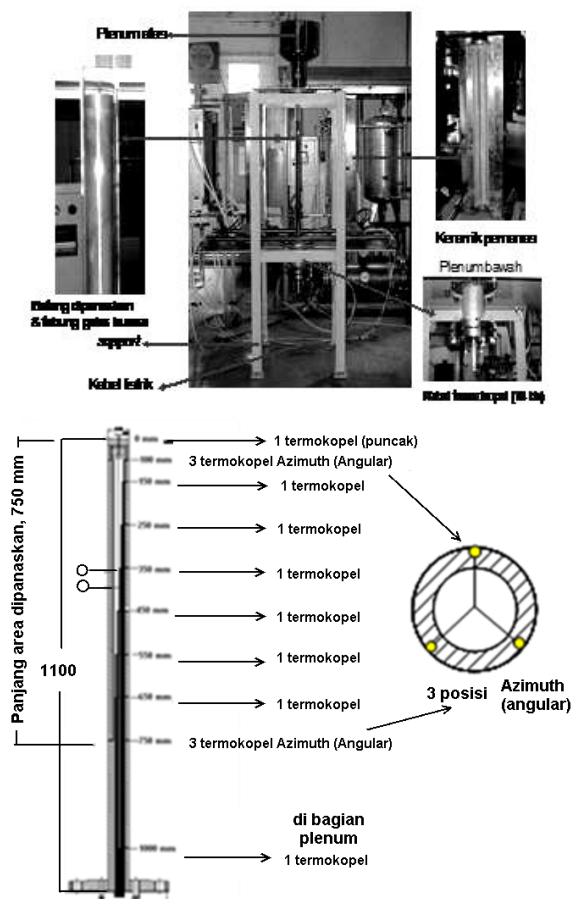
Metode penelitian yang dilakukan adalah penelitian eksperimental menggunakan bagian uji "*HeaTiNG-01*" (*Heat Transfer in Narrow Gap-01*), dengan melakukan pendekatan geometri maupun posisi celah sempit dengan anulus posisi vertikal, yang disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Pendekatan geometri celah sempit anulus pada skenario kecelakaan parah PLTN TMI-2

Peralatan Bagian Uji HeaTiNG-01

Alat untuk eksperimen ada di BAPETEN, komponen utama bagian uji HeaTiNG-01 terdiri dari *plenum* atas (tempat menampung air), tabung gelas kuarsa (panjang = 1000 mm, diameter luar = 45 mm, diameter dalam = 41 mm), batang pemanas yang merupakan simulasi *debris* untuk geometri anulus, material yang digunakan adalah SS316 dengan panjang 1100 mm (*heated length* = 800 mm). Terdapat 14 termokopel dipasang pada permukaan bagian luar batang pemanas yang digunakan untuk mengukur perubahan suhu permukaan batang pemanas selama pendidihan berlangsung. Gambar 2 menyajikan posisi pemasangan termokopel. Batang panas yang digunakan adalah pipa silinder SS316 dengan diameter luar 39 mm dan tebal rata-rata 8 mm, sehingga membentuk ukuran celah 1,0 mm dengan diameter dalam tabung gelas kuarsa. Komponen lainnya adalah *flange-flange* dan material pengikat antara tabung gelas kuarsa dengan batang pemanas. Foto Bagian uji HeaTiNG-01 dan posisi termokopel disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Foto bagian uji HeaTiNG-01 dan posisi 14 termokopel pada batang pemanas

Pelaksanaan Eksperimen

Eksperimen dilakukan terlebih dahulu dengan memanaskan batang panas (*heated rod*) dengan menaikkan daya *heater* secara bertahap, kemudian ketika suhu awal yang diinginkan tercapai, daya dimatikan. Panas akan meluruh tanpa adanya inputan daya. Eksperimen dilakukan dengan tiga variasi suhu pendingin yaitu 75°C, 85°C, dan 95°C dan suhu batang panas 650°C menggunakan ukuran celah sempit sebagai parameter tetapnya adalah 1,0 mm. Pelaksanaan eksperimen secara umum terbagi dalam tahapan berdasarkan urutan kegiatannya.

Tahap 1: Pemanasan Awal. Tahap pemanasan awal terbagi dalam tiga langkah, yaitu :

1. Langkah persiapan pemanasan, dimulai dengan ditutupnya keramik heater hingga heater dinyalakan. Langkah ini berlangsung hingga $t = 0$ (t menyatakan waktu). Pada Langkah ini, suhu dinding keramik heater masih sama dengan suhu awalnya
2. Langkah pemanasan mulai $t = 0$, saat heater dinyalakan hingga heater dimatikan, pada saat $t = t_h$, yaitu saat dimana suhu awal yang diinginkan telah tercapai.
3. Langkah persiapan pembukaan keramik heater, persiapan pembukaan keramik heater berlangsung pada saat heater telah dimatikan, saat $t = t_h$ hingga keramik heater dibuka yaitu pada saat $t = t_o$.

Tahap 2: Pendinginan Radiasi, dimulai sejak $t = t_o$ yaitu sejak dibukanya keramik heater hingga saat $t = t_{in}$ yaitu saat air mulai dimasukkan dari atas (*falling film*) ke dalam celah sempit.

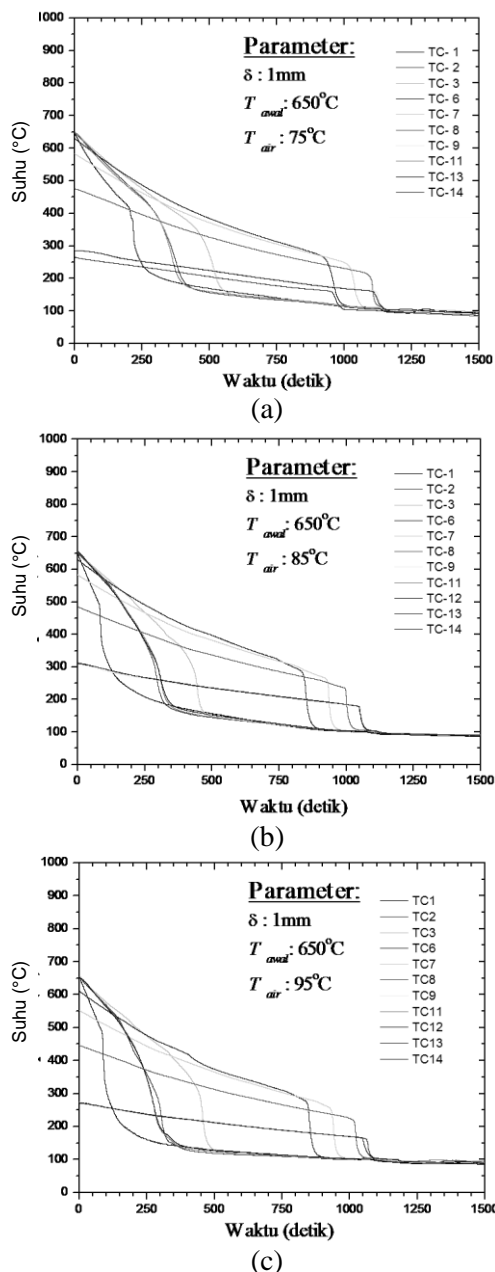
Tahap 3: Eksperimen. dimulai sejak $t = t_{in}$ yaitu saat pertama kali air dimasukkan dari atas ke celah sempit hingga eksperimen berakhir, yaitu saat $t = t_f$.

Hasil dan Pembahasan

Evolusi Suhu

Pada saat suhu awal batang pemanas mencapai suhu 650°C di salah satu titik termokopel, fluida pendingin bersuhu 75°C, 85°C, dan 95°C kemudian digelontorkan ke dalam celah sempit anulus. Hasil pengukurannya secara berturut-turut disajikan pada Gambar (3a), Gambar (3b) dan Gambar (3c), yang menunjukkan kurva penurunan suhu secara transien selama proses pendinginan berlangsung. Pendinginan pada awalnya disertai dengan golkakan air pada

bagian atas batang pemanas, dan tampak penetrasi air yang tertahan oleh uap. Uap diprediksikan terbentuk pada bagian bawah, mengingat air awalnya mengalir melalui dinding bagian dalam kuarsa tanpa menyentuh batang pemanas. Dari hasil eksperimen menunjukkan bahwa pola penurunan terjadi sama untuk berbagai variasi suhu, diawali dari TC-1 di bagian paling atas batang pemanas selanjutnya bergerak ke axial menuju TC-9 bagian paling bawah batang pemanas. Dari Gambar 5 diindikasikan telah terjadi tiga macam pendidihan, yaitu didih lapisan (FB), didih transisi (TB) dan didih inti (NB).



Gambar 3. Kurva suhu transien untuk ukuran celah 1,0 mm dan suhu batang panas 550°C

Gambar 3 memperlihatkan garis penurunan suhu untuk 3 termokopel yang sama posisi vertikalnya namun berbeda posisi angularnya (TC-2, TC-11, dan TC-12 di bagian atas, serta TC-9, TC-13 dan TC-14 di bagian bawah) berhimpit, menunjukkan bahwa perpindahan panas yang terjadi secara angular hampir sama untuk posisi horizontal. Teramati juga terjadi perbedaan waktu akhir dari FB, atau yang disebut sebagai titik pembasahan ulang (*rewetting point*). Pada suhu pendingin 75°C, tampak *rewetting point* yang lebih lama, dibandingkan dengan suhu pendingin 85°C dan 95°C. Kondisi ini diprediksikan karena keberadaan FB yang lebih lama pada suhu pendingin 75°C dibandingkan dengan suhu pendingin 85°C dan 95°C, lamanya waktu keberadaan FB diduga kuat karena pengaruh kemudahan dalam perubahan fase menjadi gas, semakin mudah berubah fase menjadi gas maka keberadaan FB semakin singkat. Eksperimen ini menunjukkan bahwa pada suhu pendingin 85°C dan 95°C lebih mudah berubah fase menjadi gas dibandingkan suhu pendingin 75°C, hal ini bisa difahami karena pada *volume* pendingin dan *temperature wall superheat* yang sama maka *heat of vaporization* pada suhu pendingin 85°C dan 95°C lebih kecil dibandingkan suhu pendingin 75°C sehingga pada suhu pendingin 85°C dan 95°C lebih cepat berubah fase menjadi gas, yang pada akhirnya menyebabkan keberadaan FB lebih singkat dibandingkan dengan suhu pendingin 75°C. Data *Rewetting point* disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbedaan *rewetting point* pada variasi suhu pendingin

Posisi Termokopel (dari atas)	t_{rewett} (detik)			T_{rewett} (°C)		
	Suhu pendingin			Suhu pendingin		
	75°C	85°C	95°C	75°C	85°C	95°C
TC-1 (0 mm)	237,66	105,06	98,01	417,44	493,16	487,03
TC-2 (50 mm)	337,01	309,47	308,82	347,71	308,69	273,84
TC-3 (150 mm)	337,01	465,16	461,96	347,71	265,82	285,75
TC-6 (450 mm)	970,71	859,86	854,74	253,90	284,04	272,91
TC-7 (550 mm)	1051,45	951,49	943,80	241,06	260,92	252,34
TC-8 (650 mm)	1135,39	1019,41	1027,74	198,04	234,27	218,58
TC-9 (750 mm)	1159,12	1077,72	1079,64	152,18	173,16	160,88

Fluk Kalor Pendidihan

Data suhu transien dari Gambar 3 digunakan untuk menghitung fluks kalor. Hasil perhitungan dibuat dalam kurva pendidihan, yaitu fluks kalor versus selisih suhu pengukuran dengan suhu saturasi air (*wall superheat*) menggunakan persamaan kesetimbangan kalor:

$$q = M_w C_{pw} \frac{dT}{dt} = h (T_w - T_{sat}) \quad (1)$$

dengan

q : fluks panas, $J/(m^2 \cdot det)$

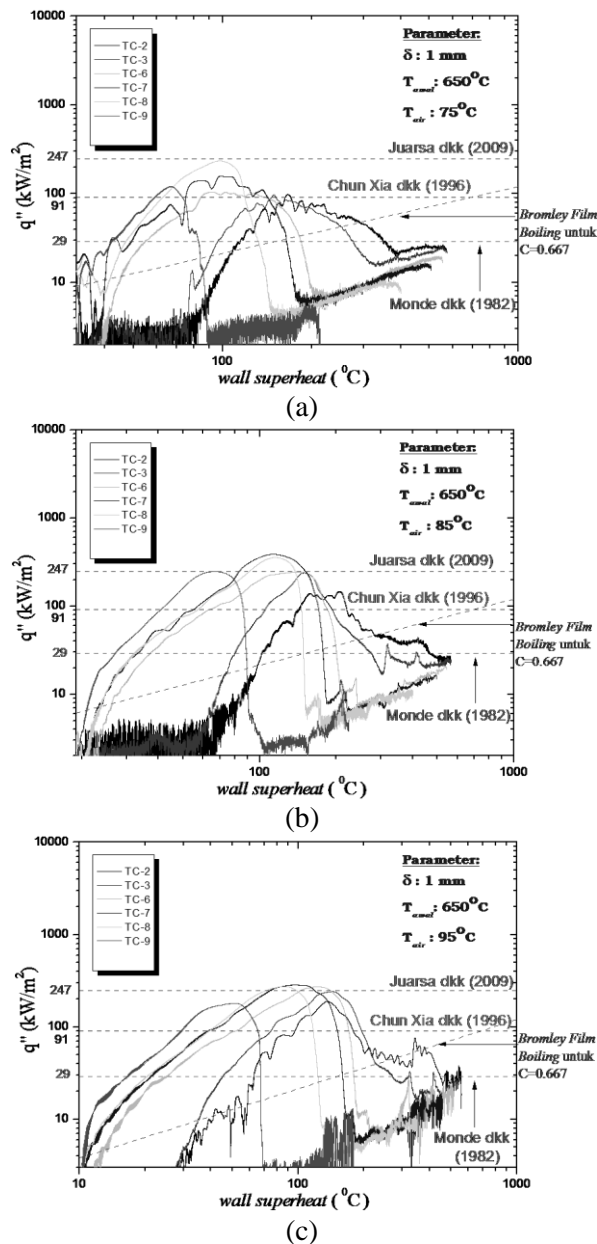
M_w : kecepatan air pendingin, $kg/(m^2 \cdot det)$

C_{pw} : kapasitas panas air pendingin, $J/(kg \cdot K)$

T, T_w : suhu, K

t : waktu, det

h : koefisien perpindahan panas, $J/(m^2 \cdot det \cdot K)$

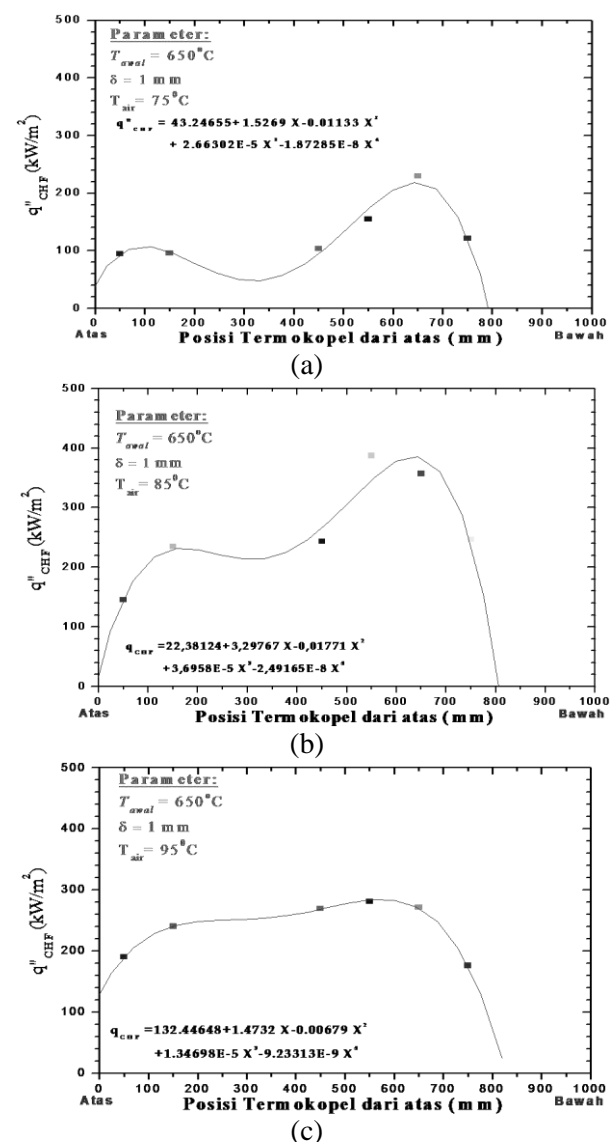


Gambar 4. Kurva pendidihan untuk berbagai variasi suhu air pendingin

Dari hasil perhitungan persamaan (1) diperoleh kurva didih untuk suhu pendingin 75°C, 85°C, dan 95°C yang disajikan berturut-turut pada Gambar 4(a), Gambar 4(b), dan Gambar 4(c). Dari Gambar 4 nampak bahwa nilai FKK maksimum pada suhu pendingin 75°C adalah 230 kW/m^2 nilainya selalu lebih rendah

dibandingkan dengan FKK maksimum pada suhu air pendingin 85°C dan 95°C pada posisi daerah batang pemanas yang sama, fenomena ini diprediksikan sebagai proses kelanjutan dari *rewetting point*, dimana pada suhu pendingin 75°C kalor yang tersimpan pada batang pemanas menjadi lebih kecil karena bagian yang digunakan untuk merubah fase lebih besar dibandingkan pada suhu air pendingin 85°C dan 95°C, sehingga nilai FKK maksimalnya akan menjadi lebih rendah dibandingkan pada suhu air pendingin 85°C dan 95°C.

Gambar 4 juga menunjukkan bahwa didih lapisan berada di bawah garis Bromley, yang menegaskan bahwa peristiwa perpindahan panas pendidihan pada celah sempit tidak sesuai untuk peristiwa didih kolam, meskipun keduanya memiliki kesamaan pada posisi vertikal.



Gambar 5. Kurva pola FKK terhadap posisi daerah batang pemanas pada berbagai variasi suhu air pendingin

Nilai FKK mendekati hasil eksperimen yang dilakukan Juarsa dkk. (2009) dengan geometri anulus, dibandingkan dengan Xia dkk. (1996) yang menggunakan geometri pelat sejajar dan Monde dkk. (1982) pada kondisi *submerge*, sehingga hal ini lebih mempertegas bahwa pengaruh geometri berperan signifikan dalam mekanisme perpindahan panas pendidihan. Meskipun demikian, semua variasi suhu air pendingin memiliki pola perubahan nilai FKK terhadap posisi daerah batang pemanas yang sama yaitu mengikuti pola polinomial. Pola tersebut, seperti disajikan pada Gambar 5(a), Gambar 5(b), Gambar 5(c), mengikuti persamaan berturut-turut untuk suhu air pendingin 75°C, yaitu:

$$q''_{CHF} = 43,24655 + 1,5269 x - 0,01133 x^2 + 2,6630 10^{-5} x^3 - 1,8728 10^{-8} x^4 \quad (1)$$

untuk suhu pendingin 85°C:

$$q''_{CHF} = 22,3812 + 3,2976 x - 0,01771 x^2 + 3,6958 10^{-5} x^3 - 2,4916 10^{-8} x^4 \quad (2)$$

dan untuk suhu pendingin 95°C:

$$q''_{CHF} = 132,4464 + 1,4732 x - 0,0068 x^2 + 1,3469 10^{-5} x^3 - 9,2331 10^{-9} x^4 \quad (3)$$

Kesamaan pola ini menunjukkan bahwa mekanisme perpindahan panas pendidihan pada berbagai suhu air pendingin adalah sama.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis fluks kalor pada kasus perpindahan panas pendidihan di celah sempit menggunakan bagian uji HeaTiNG-01 menggunakan variasi suhu pendingin disimpulkan bahwa:

Nilai FKK maksimum suhu pendingin 75°C lebih rendah dibandingkan FKK suhu pendingin 85°C dan 95°C, sedangkan FKK suhu pendingin 85°C dan 95°C nilainya berdekatan. FKK maksimum suhu 75°C adalah 230 kW/m², sedangkan FKK maksimum suhu 95°C kW adalah 282 kW/m².

Kurva FKK terhadap posisi daerah batang panas pada berbagai variasi suhu mengikuti korelasi polinomial

Pola suhu transien dan pola FKK pada variasi suhu pendingin 75°C, 85°C dan 95°C adalah sama, hal ini menunjukkan bahwa suhu air pendingin yang diskenariokan tidak berpengaruh pada mekanisme perpindahan panas pendidihan.

Berdasarkan perbandingan nilai FKK yang dihasilkan dengan peneliti lain menunjukkan bahwa faktor geometri memegang peranan yang

penting, meskipun dilakukan pada kasus yang sama yaitu didih kolam.

Peristiwa pendidihan pada celah sempit tidak termasuk kategori didih kolam dengan membandingkan area didih *film* hasil eksperimen menggunakan korelasi Bromley.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala BAPETEN, DEPUTI PKN BAPETEN, Kepala PTRKN, dan Kepala BOFa serta rekan rekan sub-bidang termohidrolika, atas bantuan dan kerjasamanya. Terima kasih khususnya kepada Bpk. Mulya Juarsa S.Si., M.E.Sc. atas koreksi dan sarannya terhadap perbaikan makalah ini dan diizinkan penggunaannya bagian uji HeaTiNG-01.

Daftar Pustaka

- Bromley, L.A., 1950. Heat transfer in stable film boiling, Chemical Engineering Program, 46-221.
- Chunlin, Xia, et al., 1996. Natural convection in vertical rectangular narrow channels, Eksperimental Thermal and Fluid Science, 12, 313-324.
- G. Satish, M. Shoji, K. Vijay, Vijay K. Dhir, 1999. Handbook of Phase Change: Boiling and Condensation, Taylor and Francis, 64.
- Juarsa, M., dan Antariksawan, A. R., 2008. Efek Batasan Counter Current Flow Pada Perpindahan Panas Pendidihan Dalam Celah Sempit, Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega 1 (1).
- Juarsa, M., Umar, E., Harto, A.W., 2009. Analisis fluks kalor pada celah sempit anulus berdasarkan tiga variasi suhu awal menggunakan bagian uji heating-01, Seminar Nasional Pengembangan Penelitian Dasar, Bandung, Indonesia.
- Monde, M., Kusuda, H. dan Uehara, H., 1982. Critical heat flux during natural convective boiling in vertical rectangular channels submerged in saturated liquid, Transactions of the ASME 104, 300-303.
- Nukiyama, S., 1934. Maximum and Minimum Values of Heat Transmitted from Metal to Boiling Water under Atmospheric Pressure, Journal of The Japanese Society of Mechanical Engineering 37, p. 367.
- Tanaka, F., Juarsa, M., Mishima, K., 2003. Experimental study on transient boiling heat transfer in an annulus with a narrow gap, Proc. of ICONE 11, France.
- US. NRC, 2007. The Accident At Three Mile Island, <http://www.nrc.gov>.
- Zang, J., Tanaka, F., Juarsa, M., Mishima, K., 2003. Calculation of boiling curves during rewetting of a hot vertical narrow channel, The 10th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, 5-9 Oktober 2003, Korea.